ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 621.39 DOI 10.12737/22153

Моделирование процесса стабилизации частоты генераторов в инфокоммуникационных системах*

О. А. Сафарьян**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Simulation of generator frequency stabilization in infocommunication systems***

O. A. Safaryan**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью исследования является моделирование процесса стабилизации частоты генераторов на примере составной части системы сотовой связи «центр коммутации — базовые станции». Задача данной работы — установление зависимостей между параметрами генераторов (число, рабочие частоты и относительные нестабильности) и стабильностью частоты генераторов. В основе исследования — применение численно-аналитической модели сигналов генераторов, формирование функции правдоподобия, из условия максимума которой определяются несмещенные, асимптотически эффективные и состоятельные оценки частоты каждого генератора. Результаты изысканий позволяют утверждать следующее. При совместной обработке измеренных значений фаз сигналов одновременно и независимо функционирующих генераторов можно получать несмещенные, асимптотически эффективные и состоятельные оценки частоты генераторов. Таким образом обеспечивается повышение стабильности частоты. Использование численного моделирования позволило оценить выигрыш в снижении относительной нестабильности частоты сигналов в зависимости от таких параметров инфокоммуникационной системы, как число генераторов и их относительные нестабильности.

The investigation objective is to simulate the process of generator frequency stabilization as in the case of a component of the cellular system “switching centre — base station”. The aim of the work is to establish dependences between the generator parameters (a number of generators, operation frequencies, and relative instability of frequencies) and the generator frequency stability. The study is based on the application of the numerical analytic model of the generator signals, and on the construction of the plausibility function when the unbiased, asymptotically efficient and consistent estimates of each generator are specified from the maximum condition. The research suggests the following results. Under the cooperative processing of the measured values of the signal phases of the simultaneously and independently operating generators, the unbiased, asymptotically efficient and consistent estimates of the generator frequencies may be obtained. This ensures the frequency stability augmentation. The use of the numerical simulation allows estimating gain in reducing the relative instability of the frequency signals depending on such infocommunication system parameters as a number of generators and their relative instability.

Ключевые слова: инфокоммуникационные системы, помехоустойчивость системы цифровых каналов связи, моделирование случайных процессов, стабильность частоты, вероятность битовой ошибки.

Keywords: infocommunication systems, interference immunity of digital channel system, stochastic process simulation, frequency stability, bit error probability.

Введение. Существующие инфокоммуникационные системы, в которых циркулируют большие объемы информации и данных, по своей структуре являются распределенными системами, содержащими значительное число функционально однотипных элементов. В дальнейшем с развитием нанотехнологий тенденция повышения сложности инфокоммуникационных систем и их интегрированности будут только возрастать. В качестве примера можно привести систему сотовой связи в целом и ее части — такие, как центр коммутации и совокупность подключенных к нему базовых станций. Еще одной особенностью современных инфокоммуникационных систем является практически полный переход на цифровые методы передачи и обработки информации [1–5].

---

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: safari_2006@mail.ru
*** The research is done within the frame of independent R&D.

Высокая стабильность частоты и фазы цифровых сигналов, формируемых на основе сложных многопозиционных кодов, неразрывно связана со стабилизацией частоты генераторов и определяет высокую эффективность инфокоммуникационных систем [1, 3, 6]. Такая эффективность предполагает высокую скорость и точность передачи больших цифровых потоков, точность измерения параметров положения и движения объектов.

В настоящее время для стабилизации частоты генераторов наиболее широко применяется метод фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [6–13]. В то же время в [12] предложен, а в [13–15] получил дальнейшее развитие метод, основанный на совместной обработке фаз формируемых сигналов. Его применение значительно повышает частоту формируемых сигналов. При этом повышение стабильности частоты возрастает с увеличением числа одновременно и независимо функционирующих генераторов, что наиболее актуально для инфокоммуникационных систем.

Целью данного исследования является разработка модели и собственно моделирование процесса стабилизации частоты генераторов на примере составной части системы сотовой связи «центр коммутации — базовые станции».

Постановка задачи. Рассмотрим совокупность K одновременно и независимо работающих генераторов в составе фрагмента системы сотовой связи «центр коммутации — K базовых станций». Каждый генератор характеризуется номинальной частотой f_{0k} формируемого сигнала ($k=1,...,K$). Однако из-за воздействия различных факторов [1, 5, 6, 11–14] частота формируемого k -м генератором сигнала отличается от номинальной на величину Δf_k , подчиняющуюся нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией D_k , связанной с относительной нестабильностью генератора соотношением $D_k = \sigma_k^2$ ($k=1,...,K$).

Основная часть. Процесс стабилизации частоты генератора определяется выполнением следующих операций.

1. В течение интервала длительности t , к точности реализации которого по отношению к номинальной длительности t_0 не предъявляется специальных требований, производится измерение фазы φ_k сигнала, формируемого каждым генератором ($k=1,...,K$).

2. С использованием соотношения $\Delta\varphi_k = \varphi_k - f_{0k}t_0$ определяется отклонение фазы $\Delta\varphi_k$ формируемого сигнала от номинального значения ($k=1,...,K$).

3. На основании полученных значений отклонений фазы сигналов, формируемых генераторами, с использованием известных параметров генераторов (номинальной частоты и относительной нестабильности) определяется функция правдоподобия:

$$L(\Delta t) = \prod_{k=1}^{K}\left[\left(\frac{1}{\sigma_k\sqrt{2\pi}}\right)^{m_k}\exp\left(-\frac{m_k\left(\Delta f_k - \Delta f_{0k}\right)^2}{2\sigma_k^2 f_{0k}^2}\right)\right]. \quad (1)$$

4. Из условия достижения максимума функции правдоподобия определяется оценка отклонения частоты каждого генератора от номинального значения на указанном интервале измерений

$$\Delta\hat{f}_k = t_0^{-1}\left(\Delta\varphi_k - 2\pi f_{0k}\left(\sum_{p=1}^{K}\sigma_p^{-2}\right)^{-1}\sum_{p=1}^{K}\left(\Delta\varphi_p - 2\pi f_{0p}t_0\right)\sigma_p^{-2} f_{0p}^{-1}\right),\ (k=1,...,K). \quad (2)$$

На основе полученной оценки формируется сигнал управления для коррекции частоты генератора.

В частном случае совокупности K генераторов, имеющих одинаковые параметры (номинальную рабочую частоту, относительную нестабильность частоты), использование соотношения (2) позволяет получить следующий результат:

$$\sigma_{\Delta\hat{f}_k} = \frac{\sigma_{\Delta f_k}}{\sqrt{K}},\ (k=1,...,K). \quad (3)$$

Таким образом, использование данного алгоритма обработки сигналов позволяет в случае системы генераторов с одинаковыми параметрами уменьшить относительную нестабильность частоты генераторов в $\sqrt{K}$ раз. При этом, как показывают приведенные в [12–14] результаты, получаемые оценки являются несмещенными, асимптотически эффективными и состоятельными.

Сформулированный алгоритм позволил разработать устройство стабилизации частоты генераторов и вычислительные программы в среде *MathCad* 15.0. С их помощью смоделирован процесс стабилизации и получены оценки достигаемого повышения стабильности частоты генераторов в информационной системе. Отмеченные свойства оценок использовались при тестировании и верификации разработанной вычислительной программы [16], моделирующей указанный алгоритм с использованием процедур, описанных в [17]. В частности, определялись математическое

ожидание и дисперсия частоты каждого генератора, получаемые при разном количестве рассматриваемых в системе генераторов и задаваемом числе реализаций случайного процесса. Получаемые значения сравнивались для частного случая совокупности генераторов с одинаковыми параметрами с результатом, найденным на основе соотношения (3). Рассмотрим пример, когда произведение количества генераторов и числа реализаций случайного процесса превышает 10000. Определим с использованием численного моделирования вероятность отклонения получаемого значения нестабильности генераторов от теоретической величины больше чем на 0,01. Результаты показывают, что с учетом асимптотической эффективности полученных оценок частоты всех генераторов указанная вероятность не превышает 0,011.

Результаты исследований для случая десяти генераторов $K=10$, имеющих различные номинальные частоты и относительные нестабильности, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Оценки отклонений частоты генераторов

Номинальные значения f_{0k}, ГГц	Действительные значения f_k, ГГц	Ошибка определения частоты генератора σf_{0k}, кГц
5,000000	5,00001	–0,966
6,000000	5,99999	–1,159
7,000000	6,99997	–1,352
8,000000	7,999996	–1,546
9,000000	9,00001	–1,739
10,000000	9,999998	–1,932
11,000000	11,00001	–2,126
12,000000	12,00001	–2,319
13,000000	13,00001	–2,512
14,000000	14,00001	–2,705

На рис. 1 приведены результаты моделирования, полученные с использованием вычислительной программы [16], представляющие отношения отклонения частоты стабилизируемого генератора к отклонению частоты одиночного генератора без использования стабилизации.

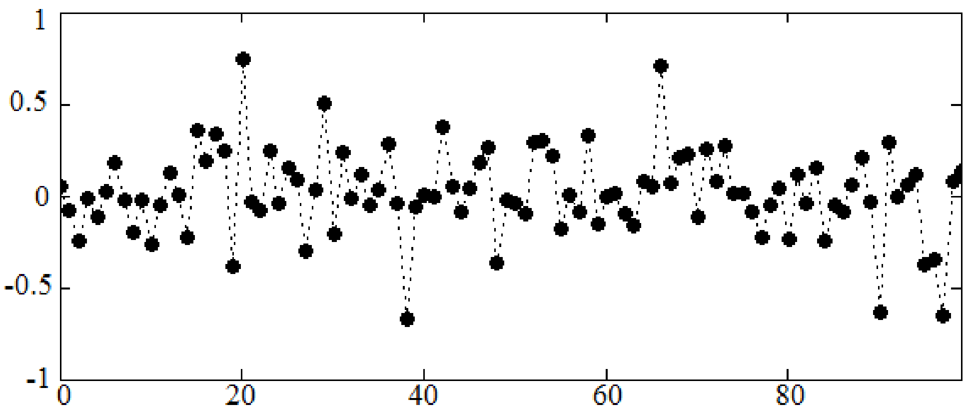


Рис. 1. Статистическое распределение нормированной величины отклонения частоты стабилизируемого генератора к величине отклонения частоты нестабилизируемого генератора

Приведенные результаты показывают, что ошибка оценки отклонения частоты генератора от номинального значения значительно меньше величины самого отклонения, что свидетельствует о повышении точности оценивания частот при использовании предложенного метода. При этом необходимо отметить, что при увеличении длины выборки, т. е. числа генераторов в системе, расхождение оценки с истинным значением будет уменьшаться. Таким образом, данный метод позволяет повысить точность оценивания частот одновременно и независимо работающих генераторов и тем самым при необходимости — стабильность частоты данных генераторов.

Выводы. Математическая модель процесса стабилизации частоты генераторов разработана с учетом нормального закона распределения отклонения частоты генераторов от номинального значения. Указанная модель реализуется при:
— совместной обработке результатов измерений фаз, создаваемых различными генераторами сигналов;
— формировании на основе этих измерений оценок отклонения частоты генераторов путем обеспечения максимума функции правдоподобия.

Получаемые в частных случаях с использованием разработанной модели данные позволяют верифицировать результаты численного моделирования.

Таким образом, возможно определить повышение стабильности частоты формируемых сигналов при различных параметрах генераторов (количество, номинальная частота и относительная нестабильность).

Библиографический список

1. Деундяк, В. М. Имитационная модель цифрового канала передачи данных и алгебраические методы помехоустойчивого кодирования / В. М. Деундяк, Н. С. Могилевская // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2001. — № 1. — С. 98–105.

2. Сумбатян, М. А. Алгоритм цифровой обработки акустических сигналов аудиофайлов и их распознавание на основе объективных критериев / М. А. Сумбатян, С. Е. Шевцов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2008. — № 3. — С. 238–245.

3. Васильев, А. Ф. Программируемый цифровой преселектор для систем радиосвязи двойного назначения / А. Ф. Васильев, Е. А. Меркулов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 2. — С. 5–11.

4. Enhancements to GPS Operations and Clock Evaluations Using a “Total” Hadamard Deviation / D.-A. Howe [et al.] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. — 2005. — Vol. 52, № 8. — P. 1253–1261.

5. Bregni, S. Generation of Pseudo-Random Power-Law Noise Sequences by Spectral Shaping / S. Bregni // Communications World / ed. N. Mastorakis. — Geneva : WSES Press, 2004. — P. 142–150.

6. Riley, W.-J. Handbook of Frequencies Stability Analysis / W.-J. Riley ; NIST National Institute of Standards and Technology ; US Department of Commerce. — Washington : U. S. Government Printing office, 2008. — P. 338–357.

7. Allan, D.-W. Characterization of Precision Clocks and Oscillators / D.-W. Allan // Proc. 5th European Frequency and Time Forum. — Stellenbosch, March 1991. — P. 1–9.

8. Riley, W.-J. Techniques for Frequency Stability Analysis / W.-J. Riley // IEEE International Frequency Control Symposium. — Tampa, May 2003. — P. 329–334.

9. Howe, D.-A. Interpreting Oscillatory Frequency Stability Plots / D.-A. Howe // IEEE International Frequency Control Symposium. — Newport Beach, May 2002. — P. 725–732.

10. Howe, D.-A. TeoH Bias-Removal Method / D.-A. Howe, J. McGee-Taylor, T. Tasset // IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Symposium. — New Delhi, June 2006. — Vol. 56, № 7. — P. 788–792.

12. Способ стабилизации частоты генератора : патент 2197060 Рос. Федерация : H03L7/00 ; G01R23/12 / Д. Д. Габриэльян [и др.]. — № 2000128423/09 ; заявл. 13.11.2000 ; опубл. 20.12.2003, Бюл. № 35. — С. 1–20.

13. Методы высокоточных измерений и воспроизведения физических величин / Габриэльян [и др.] // Физические основы приборостроения. — 2012. — Т. 1, № 2. — С. 72–77.

14. Сафарьян, О. А. Метод статистической стабилизации частоты независимо работающих генераторов в инфокоммуникационных системах : дис. … канд. техн. наук / О. А. Сафарьян. — Ростов-на-Дону, 2014. —151 с.

15. Устройство стабилизации частоты генераторов : патент 144228 Рос. Федерация ; H03L7/00 / О. А. Сафарьян, Д. Д. Габриэльян, В. В. Шацкий ; ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет». — № 2014111456/08 ; заявл. 25.03.2014 ; опубл. 10.08.2014, Бюл. № 22. — С. 1–2.

16. Сафарьян, О. А. Моделирование метода стабилизации частот генераторов : св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2013661291 / О. А. Сафарьян, Д. Д. Габриэльян ; ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет». — № 2013619498 ; заявл. 21.10.2013 ; зарегистр. 05.12.13. — 1 с.

17. Нейдорф, Р. А. Аппроксимационное построение математических моделей по точечным экспериментальным данным методом «cut-glue» / Р. А. Нейдорф // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14, № 1 (76). — С. 45–59.

References

1. Deundyak, V.M., Mogilevskaya, N.S. Imitatsionnaya model' tsifrovogo kanala peredachi dannykh i algebraicheskie metody pomekhoustoychivogo kodirovaniya. [The simulation model of the digital data channel and algebraic methods of error control coding.] Vestnik of DSTU, 2001, no. 1, pp. 98–105 (in Russian).

2. Sumbatyan, M.A., Shevtsov, S.E. Algoritm tsifrovoy obrabotki akusticheskikh signalov audiofaylov i ikh raspoznavanie na osnove ob"ektivnykh kriteriev. [The algorithm of digital processing for acoustic signals of audio files and their recognition the basis of some objective criteria.] Vestnik of DSTU, 2008, no. 3, pp. 238–245 (in Russian).

3. Vasilyev, A.F., Merkulov, E.A. Programmiruemyy tsifrovoy preselektor dlya sistem radiosvyazi dvoynogo naznacheniya. [Programmable digital preselector for dual-purpose radio communication systems.] Vestnik of DSTU, 2012, iss. 1, no. 2, pp. 5–11 (in Russian).

4. Howe, D.-A., et al. Enhancements to GPS Operations and Clock Evaluations Using a “Total” Hadamard Deviation . IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2005, vol. 52, no. 8, pp. 1253–1261.

5. Bregni, S. Generation of Pseudo-Random Power-Law Noise Sequences by Spectral Shaping. N. Mastorakis, ed. Communications World, Geneva: WSES Press, 2004, pp. 142–150.

6. Riley, W.-J. Handbook of Frequencies Stability Analysis. NIST National Institute of Standards and Technology; US Department of Commerce. Washington U.S. Government Printing office, 2008, pp. 338–357.

7. Allan, D.-W. Characterization of Precision Clocks and Oscillators. Proc. 5th European Frequency and Time Forum. Stellenbosch, March 1991, pp. 1–9.

8. Riley, W.-J. Techniques for Frequency Stability Analysis. IEEE International Frequency Control Symposium. Tampa, May 2003, pp. 329–334.

9. Howe, D.-A. Interpreting Oscillatory Frequency Stability Plots. IEEE International Frequency Control Symposium. Newport Beach, May 2002, pp. 725–732.

10. Howe, D.-A., McGee-Taylor, J., Tasset, T. TeoH Bias-Removal Method. IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control Symposium. New Delhi, June 2006, vol. 56, no. 7, pp. 788–792.

12. Gabrielyan, D.D., et al. Sposob stabilizatsii chastoty generatora: patent 2197060 Ros. Federatsiya: H03L7/00; G01R23/12. [Methods of oscillator frequency stabilization.] Patent RF, no. 2197060, 2003 (in Russian).

13. Gabrielyan, D.D., et al. Metody vysokotochnykh izmereniy i vosproizvedeniya fizicheskikh velichin. [Method of estimating frequency generator system.] Physical Bases of Instrumentation, 2012, vol. 1, no. 2, pp. 72–77 (in Russian).

14. Safaryan, O.A. Metod statisticheskoy stabilizatsii chastoty nezavisimo rabotayushchikh generatorov v infokommunikatsionnykh sistemakh: dis. … kand. tekhn. nauk . [Method of statistical frequency stabilization of independent operating generators in the info-communication systems: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 2014, 151 p. (in Russian).

15. Safaryan, O.A ., Gabrielyan, D.D., Shatskiy, V.V. Ustroystvo stabilizatsii chastoty generatorov: patent 144228 Ros. Federatsiya; H03L7/00. [Device of generator frequency stabilization.] Patent RF, no. 144228, 2014 (in Russian).

16. Safaryan, O.A., Gabrielyan, D.D. Modelirovanie metoda stabilizatsii chastot generatorov: sv-vo o gos. registratsii programm dlya EVM № 2013661291. [Modeling method of stabilization of frequency generators: State Registration Certificate of computer programs no. 2013661291] DSTU, 2013 (in Russian).

17. Neydorf, R. A. Approksimatsionnoe postroenie matematicheskikh modeley po tochechnym eksperimental'nym dannym metodom «cut-glue». [Approximating mathematical model development according to point experimental data through “cut-glue” method.] Vestnik of DSTU, 2014, no.1 (76), pp. 45–59 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.09.2016
Сдана в редакцию 15.09.2016
Запланирована в номер 30.09.2016

Received 15.09.2016
Submitted 15.09.2016
Scheduled in the issue 30.09.2016